

黄土生土建筑震害预测研究

石玉成^{1,2}, 王兰民^{1,2}, 林学文², 徐晖平^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:通过对黄土地区生土建筑民房的现场调查和测试,分析了各种类型生土建筑的结构特点和自振特性,归纳总结了影响生土建筑震害的主要因素和目前存在的主要问题,在此基础上提出了生土建筑震害预测方法,并给出了初步预测结果。

关键词:黄土;生土建筑;震害预测

中图分类号:P315.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2004)03-0206-06

0 引言

黄土生土建筑主要包括平房和窑洞两种型式,在我国西北广大村镇,尤其是在经济尚不发达的地区仍大量采用。平房以黄土土坯墙或土筑墙承重的房屋占有相当大的比重,在多数情况下,震害要比其它结构严重。黄土窑洞在我国有悠久的历史,特别是在西北黄土高原,黄土窑洞成为一些地区农村民居的主要建筑形式之一。近些年来,由于能源问题的突出,窑洞建筑受到了国内外专家学者的高度重视和赞誉。在人口不断增加、可耕地逐渐减少、生存环境不断恶化的今天,加强对窑洞抗震问题的研究,除了可保证千百万窑居者的生命安全、减少因弃窑建房而需另占宅基地外,也有利于生态环境的发展。新近颁布的《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)对村镇生土房屋的抗震设计和施工要求作了一般性规定,但目前农村建房随意性很大,与规范规定相距甚远。因此开展生土建筑震害预测研究具有重要意义。

1 黄土地区生土建筑种类、结构特征及自振特性

1.1 黄土生土建筑分类及其结构特征

生土建筑抗震性能主要取决于承重体系整体的强度和稳定性,因此,以生土建筑的承重体系作为划分生土建筑类型的依据,将西北黄土地区常见的生土建筑划分为5种类型^[1],即:木架承重房屋、墙体承重房屋、混合承重房屋、土坯拱房、黄土窑洞。

1.1.1 木架承重房屋

屋顶全部荷载均由木架承受,其墙体仅起间隔或围护作用,按其结构整体强度和稳定性,又可分为简单木架房和正规木架房两种。

(1)简单木架房:屋架的整体由柱、梁、檩和横向拉棒构成,但拉棒多不齐全,或仅由柱、梁、檩构成屋架(图1)。节点多为榫接。一般木料较细,材质较差。

(2)正规木架房:也称“穿斗木架房屋”。木架结构完整,梁、檩、柱、棒齐全,且多为“双檩双棒”(图2)。结构各节点全为卯榫结合,榫头加木销铆固,整体性及柔性均好。外型上多为两面坡顶。木架房的屋盖系统由檩、椽及屋顶铺盖部分组成,墙体为黄土土坯或土夯墙。

1.1.2 墙体承重房屋

收稿日期:2003-07-31

基金项目:甘肃省科技攻关计划项目(2GS035-A35-081);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20040048

作者简介:石玉成(1966—),男(汉族),山东沂水人,博士,研究员,主要从事地震工程研究。

该类型房屋的承重体系为墙体,即通称的“土搁梁”、“通檩房”。房屋的大梁或檩子直接搭放在承重夯土墙或土坯墙上,一般无固定措施,墙体承受屋盖系统全部荷载(图3)。作为承重墙体,有土墙、土石混筑墙和砖柱土坯墙等类型。

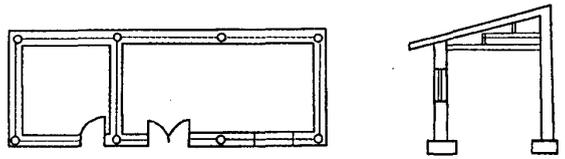


图1 简单木架承重房屋示意图

Fig.1 Sketch of simple wood frame house.

1.1.3 混合承重房屋

其结构特点介于木架承重和墙体承重两种结构类型之间,即部分为墙体承重,部分为简单木架承重,外型多为单面坡顶(图4)。由于仅在房屋中部由梁柱或檩柱构成简单木架,因此房屋结构的整体性差,强度分布不均匀。前墙和隔墙多为土坯筑砌,山墙、后墙则多为夯土墙。

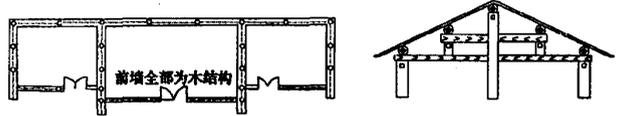


图2 穿斗木架承重房屋示意图

Fig.2 Sketch of conneted wood frame house.

1.1.4 土坯拱房

拱房实际是墙体承重类型房屋的一种特殊型,屋顶由土坯砌成拱形(图5)。土坯拱窑的侧墙多为夯土墙,前后墙多为土坯砌筑。这种类型房屋修建简单,不需木料,就地取材,造价低廉,抗震性能极差。

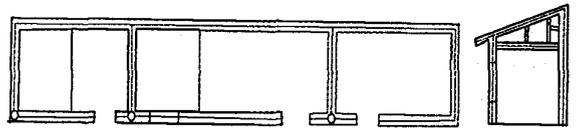


图3 墙体承重房屋示意图

Fig.3 Sketch of loess wall house.

1.1.5 黄土窑洞

黄土窑洞是穴居的一种形式,也是生土建筑类型中最为简单、经济、不需木料、冬暖夏凉、更新周期长、抗震性能好的纯生土建筑。窑洞有两种类型:一种是开挖在黄土沟谷崖边或黄土坡坎上(崖窑);另一种如陇东地区的地坑式崖窑(地窑)^[2]。窑洞的大小不一,窑顶一般是半圆形或楔形。有的地方根据需要,在主窑的侧面再开挖形状及大小各异的多个侧窑室。

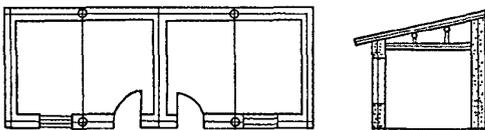
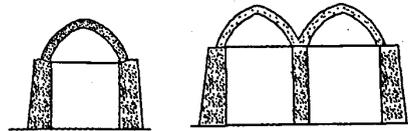


图4 混合承重房屋示意图

Fig.4 Sketch of loess wall and wood frame.



(a)单拱

(b)双拱

图5 土坯拱窑示意图

Fig.5 Sketch of adobe cave dwelling.

1.2 黄土生土建筑的自振特性

建筑物的抗震性能和破坏形式与其动力特性有密切的关系。虽然计算中可以采用理论计算的方法来决定结构的自振周期,但理论计算往往与实际情况有一定出入。本文通过现场实测获得各类生土建筑的自振周期,如表1所示。

表1 黄土地区不同类型生土建筑的自振周期

房屋类型	统计点数	垂向周期/s		横向周期/s		纵向周期/s	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
简单木架房	8	0.080~0.132	0.110	0.114~0.179	0.149	0.100~0.130	0.115
穿斗木架房	12	0.083~0.151	0.134	0.122~0.245	0.185	0.084~0.152	0.120
混合承重房	10	0.092~0.116	0.098	0.118~0.128	0.128	0.122~0.124	0.123
墙体承重房	15	0.078~0.224	0.127	0.111~0.250	0.158	0.075~0.204	0.143
土坯拱房	5	0.083~0.102	0.093	0.154~0.191	0.173	0.100~0.160	0.130

2 影响黄土生土建筑抗震性能的主要因素及存在问题

黄土生土建筑的抗震性能及震害特征与地震动特征、场地和地基条件、房屋结构构造属性以及房屋质量现状密切相关。民房现场调查表明,由于缺乏必要的技术指导,农民建房各行其是,房屋质量现状堪忧,这与房屋构造上的缺陷有很大关系。

2.1 地震动特征

地震动强度愈大,房屋震害愈重;地震动的频谱成分对房屋震害也有较大影响,不同频谱特征的地震动对房屋的破坏后果不同;地震动持时对房屋的破坏也有一定的影响,持时越长,结构的变形破坏累积越大,造成的破坏越重。

2.2 场地和地基条件

包括地质构造(有无活动断裂)、地形地貌、场地类别、土质条件、地下水埋深以及地震时可能引起的次生灾害等。

建设场地选择不当和地基处理不善是房屋抗震安全的一个重要隐患。目前农村许多房屋位于地震时可能发生滑坡、崩塌、地陷、地裂、泥石流等及发震断裂带上发生地表位错的部分,或者位于软弱土、液化土、条状突出的山咀、河岸和边坡边缘等场地上,加之地基处理不当或未作处理,容易产生地基失效,房屋震害通常很重。

2.3 房屋结构构造属性

房屋自身属性包括结构类型、几何尺寸、材料特性、平面布置、构造措施等因素。现在农村建房大都未进行设计,农民缺乏对房屋抗震知识的了解和对房屋抗震经验的总结与推广,只是根据传统方式和房主的爱好随意建造,严重影响了房屋的抗震稳定性,主要表现在:

(1)房屋的构造不利于抗震。许多房屋及窑洞开间和进深尺寸过大,门洞和窗户既多且大,整个墙面被严重削弱;木柱或砖柱与木梁没有任何拉结,隔墙与纵横墙之间没有采取可靠的连接措施,横隔墙布置失当。

(2)土坯材料和木骨架材料强度低。黄土制坯水土比过高或过低,含砂率偏高,或麦草、麦衣含量不合适,有时采用含杂质较多的耕土制坯,致使墙体抗震强度不足。木构架强度不足及其老旧程度严重也是造成房屋破坏严重的一个原因。

(3)屋盖整体刚度很弱。木梁、木檩条直接支承于墙体上,没有可靠、牢固的连接措施。木檩条有的仅用几个钉子钉于梁上,端部房间的檩条往往直接搁在山墙上,不加任何措施。地震时,山墙容易外闪,造成屋盖坍塌。

(4)施工工艺、流程、方法不尽合理,施工质量粗糙。施工时内、外墙未同时咬槎砌筑,土坯墙的土坯未错缝卧砌,夯打密实不均匀等都对房屋的震害有重要影响。

(5)黄土窑洞拱顶覆土兼保温与排水功能,但有许多窑洞覆土过厚,自重过大,地震效应显著,破坏较重。

2.4 房屋质量现状

房屋质量现状对房屋抗震能力影响极大。由于受经济条件的限制,在黄土地区有相当数量的房屋未能及时维修或更换,一些危房未采取加固措施。其主要病害表现为墙体产生裂缝或歪闪、地基下沉、木骨架陈旧老朽或遭虫蛀、倾斜、纵横墙联结处出现竖向裂缝等;黄土窑洞则表现为拱顶出现裂缝或酥裂、窑脸分布斜裂缝、崩塌等^[2]。这类房屋震时破坏极其严重,常常导致人员伤亡。

3 黄土生土建筑震害预测

3.1 生土平房震害预测方法

3.1.1 震害预测方法

黄土生土建筑是一种脆性结构,抗拉、抗剪能力低。在强烈地震作用下,易发生脆性的剪切破坏,导致房屋的破损或倒塌。墙体的好坏将直接影响到其抗震能力,即使木架承重房屋也是如此;另外平房在建造年代、质量现状、场地条件等方面的差异也影响到震害。因此,在确定震害预测模型时,我们选择平房承重结构的强度和老旧程度作为影响震害的主要参数。

(1)墙体抗震强度震害指数 D_a :大量震害表明,在遭到地震作用时,平房主要发生墙体的剪切破坏。因此,作为主要承重构件的墙体的抗震强度系数 m 是预估房屋震害的主要参数之一,表示为

$$m = \frac{R_t A}{3Q}$$

式中: Q 为墙体承受的地震剪力; R_t 为验算抗震强度时墙体的抗剪强度; A 为墙体水平截面面积。

根据震害经验的统计分析,抗震强度震害指数 D_a 与墙体的抗震强度系数 m 的关系如表 2 所示。

表 2 震害指数 D_a 与墙体抗震强度系数的关系

强度系数 m	≥ 1	1~0.8	0.8~0.4	0.4~0.1	< 0.1
震害指数 D_a	0	0.25	0.50	0.75	1

(2)房屋质量影响指数 D_b :平房的质量对房屋的抗震能力影响很大,因此,应根据房屋的现状调查和以前的震害经验综合考虑房屋质量的影响,同时考虑场地条件与结构类型的影响,分别见表 3~表 5。

表 3 房屋质量影响指数 D_b

房屋质量现状	烈 度			
	VI	VII	VIII	IX
质量较好的新建平房	0	0.10	0.20	0.30
质量较差的新建房屋和基本完好的旧房	0.15	0.25	0.35	0.45
已有较大损坏的旧房	0.30	0.45	0.60	0.75
严重损坏的危房	0.40	0.60	0.80	1.00

表 4 场地条件调整系数

调整系数	抗震有利地段	抗震不利地段	危险地段
K_s	1.0	1.2	1.4

表 5 结构类别调整系数

调整系数	简单木架房	正规木架房	墙体承重房	混合承重房	土坯拱房
K_c	1.0	0.8	1.0	0.9	1.2

按照房屋质量现状和老旧程度对其抗震能力影响的大小冠以不同的影响系数(β_1, β_2),同时考虑场地条件和生土建筑类别的影响,求出其震害指数:

$$D = K_s K_c (\beta_1 D_a + \beta_2 D_b) = K_s K_c (0.55 D_a + 0.45 D_b) \quad (\text{若 } > 1, \text{ 则取为 } 1)$$

3.1.2 房屋震害等级及判定条件

根据黄土地区生土建筑震害特点,以承重构件的破坏程度作为主要标志,将房屋破坏划分为以下 5 个等级,见表 6;震害判定条件见表 7。

表 6 黄土地区生土平房震害等级划分标准

震害等级	震害描述
基本完好	木架及墙都基本完好,非承重墙体轻微裂缝。
轻微损坏	木架完好,轻度溜瓦,承重墙体完好或部分轻微裂缝;非承重墙体多数轻微裂缝。
中等破坏	木架基本完好,严重溜瓦,承重墙体多数轻微破坏或部分明显破坏;非承重墙体明显破坏。
严重破坏	木架产生大变形,承重墙体多数明显破坏或部分严重裂缝,承重屋架或檩条断落引起部分屋面塌落;非承重墙体多数严重裂缝或倒塌。
倒塌	全部落架倒塌

表7 震害判定条件

震害等级	基本完好	轻微损坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
震害指数	0~0.2	0.21~0.4	0.41~0.6	0.61~0.8	0.81~1.0

3.2 黄土窑洞震害预测方法

3.2.1 震害预测方法

对于崖窑而言,首先预测窑洞所在边坡的地震稳定性,若安全系数 $F_s \geq 1.2$,边坡处于稳定状态。在此基础上,对窑洞的抗震稳定性进行预测。

黄土窑洞抗震验算采用我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)^[3]中规定的水平地震峰值加速度反应谱对黄土窑洞进行抗震验算,计算洞室周围土体应力分布情况,也可采用时程分析方法。

3.2.2 窑洞震害等级及判定条件

根据黄土窑洞震害特点,以洞室周围土体破坏情况作为震害等级的标准,具体判定条件见表8。

表8 黄土窑洞震害等级划分标准

震害等级	震害描述
基本完好	拱顶及洞壁土体完好
轻微损坏	拱顶及洞壁土体产生轻微裂缝。
中等破坏	拱顶严重开裂,洞壁土体或洞口底部有较多裂缝。
严重破坏	拱顶局部坍塌或洞壁土体大面积塌落,窑洞洞脸破坏严重。
倒塌	拱顶全部坍塌或大部分坍塌,或产生滑坡引起塌毁。

大量计算结果表明,黄土窑洞在静荷载和地震荷载作用下,窑洞洞室底部中央的竖向位移最大;洞底边范围内的塑性区较深,洞底边两底角处应力集中现象显著,在这部位土体的最大主应力均为拉应力,一般均超过黄土的抗拉强度,这是造成洞室地面开裂,边墙根部土体剥落的主要原因。

若黄土窑洞边坡安全系数 F_s 小于 1.0~1.2,则窑洞处于倒毁状态。若黄土窑洞边坡安全系数 F_s 大于 1.0~1.2,则根据窑洞抗震验算结果作进一步判定:洞室周围土体处于弹性状态,窑洞基本完好;拱顶或洞顶局部出现塑性区,但范围很小,窑洞处于轻微损坏状态;拱顶或洞顶局部出现较大范围的塑性区,洞底边范围内出现塑性区,窑洞处于中等破坏状态;拱顶或洞顶出现大范围的塑性区,洞底边范围内塑性区较深,窑洞处于严重破坏状态;洞室周围土体塑性区贯通且范围大,洞底边范围内的塑性区深,窑洞处于塌毁状态。

3.3 黄土生土建筑震害预测结果

根据现场考察、测试结果,综合考虑场地条件、房屋结构类型、质量、建造年代等因素,选取典型房屋进行抽样分析计算,对各类生土建筑在地震烈度 VI~IX 度情况下的震害进行预测分析,结果见表9。

震害预测结果表明:正规木架房抗震性能最好,简单木架房和墙体承重房屋抗震性能较差,土坯拱房抗震性能最差,其它类型的黄土生土建筑抗震性能一般;在 VIII 度及其以上烈度地区,各类生土建筑破坏均较严重,简单木架房、土坯拱房和黄土窑洞不宜在 IX 度区修建。

4 结语

生土建筑具有就地取材、因地制宜、施工简便的优点,且经济实用,在我国西北地区农村还将长期存在。理论分析和震害经验表明,在遭遇中等强度地震时生土建筑震害即较为严重,因此加强对农村民房的抗震研究显得尤为重要。已有的实践经验证明,只要在宅地选择、地基处理、结构设计、施工工艺等方面采取合理的对策和必要的抗震措施,就可以有效减轻地震造成的损失。同时,随着黄土高原经济建设的发展,要依靠科技进步,大力开展抗震技术推广活动,认真总结已有的震害经验,加强防震减灾科普宣传教育,逐渐摆脱传统习惯的束缚,接受科学的建房观念,逐步提高农村住宅的抗震防灾能力。

表9 黄土生土建筑震害预测结果

房屋类型	地震水平/度	基本完好/%	轻微损坏/%	中等破坏/%	严重破坏/%	倒塌/%
正规木架房	VI	70~80	12~18	5~10	3~7	<3
	VII	45~55	15~25	10~14	5~10	<10
	VIII	20~25	10~16	27~33	18~23	10~20
	IX	<10	8~12	10~15	20~25	>45
简单木架房	VI	50~55	18~22	13~17	8~12	<10
	VII	28~32	12~18	17~22	13~16	19~23
	VIII	<3	14~17	25~30	15~20	30~40
	IX	0	<5	4~6	28~33	>60
墙体承重房	VI	50~60	16~24	11~15	6~10	<5
	VII	25~35	18~22	20~24	10~15	10~20
	VIII	<5	20~25	5~10	15~20	40~55
	IX	0	<5	3~6	5~8	>85
混合承重房	VI	60~65	20~25	5~8	4~7	<4
	VII	30~40	15~20	10~15	12~18	15~25
	VIII	15~20	25~30	5~10	20~25	20~30
	IX	<5	5~11	7~12	20~25	>55
土坯拱房	VI	40~45	18~25	17~25	5~12	3~9
	VII	18~26	10~15	8~13	20~25	30~35
	VIII	<2	8~11	5~8	30~35	>50
	IX	0	0	0	<10	>90
黄土窑洞	VI	65~70	8~15	7~11	5~10	<5
	VII	40~45	15~20	10~16	10~20	8~15
	VIII	12~20	20~30	15~20	20~30	10~25
	IX	0	<8	6~12	10~15	>70

注:计算中烈度所对应的地震动加速度 VI度:0.05g, VII度:0.10~0.15g, VIII度:0.20~0.30g, IX度:0.40g

[参考文献]

- [1] 林学文,宋福堂.民用房屋的抗震[M].兰州:甘肃省人民出版社,1980.
 [2] 石玉成,林学文,王兰民,等.黄土地区生土建筑震害特征及防灾对策研究[J].自然灾害学报,2003,12(3):87-92.
 [3] 中华人民共和国建设部.建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

PREDICTION ON EARTQUAKE DAMAGE OF RAW SOIL BUILDINGS IN LOESS AREA

SHI Yu-cheng^{1,2}, WANG Lan-min^{1,2}, LIN Xue-wen², XU Hui-ping²

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: Through field investigation and testing in loess areas, the structure characteristics and natural vibration periods of different kinds of raw soil buildings are analyzed, and the major factors influencing on earthquake damage and some problems in seismic resistance of the raw soil buildings are summarized. Based on this, a method of predicting the earthquake damage of different kinds of raw soil buildings is put forward and some preliminary results are provided, too.

Key words: Loess; Raw soil buildings; Prediction on earthquake damage